УДК 621.313

ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ИНДУКТОРНО-КОМПРЕССИОННОГО ГЕНЕРАТОРА

А.И. Чучалин, И.О. Муравлев, И.А. Сафьянников

Томский политехнический университет
E-mail: iom@cam.tpu.ru

В системах питания электрофизических установок (источников накачки лазеров, установок высокого напряжения для питания ускорительной техники и т.д.) в качестве электромашинного источника импульсной мощности широко используют индукторно-компрессионные генераторы дискового типа. Такие генераторы позволяют получить частоту генерируемых импульсов 50...400 Гц при напряжении до 50 кВ и выше. В статье приведен принцип действия генератора, результаты исследования его работы на емкостную и активную нагрузки.

С развитием новых технологий увеличивается число потребителей электроэнергии средней мощности ~10^4 Вт, которые необходимо питать высоким переменным напряжением ~10^4 В при частоте 10^2...10^3 Гц. Это автономные установки с активно-емкостным характером нагрузки, в том числе: мобильные озонаторные устройства для очистки воды и воздуха, установки по обеззараживанию воды, требующие компактных автономных источников электроэнергии, источники накачки лазеров, установки высокого напряжения для питания ускорительной техники и т.д. Для питания таких установок зачастую применяют электромашинные генераторы индукторного типа дисковой конструкции для обеспечения быстрого заряда конденсаторных батарей. Традиционно питание таких потребителей осуществляется за счет преобразования напряжения и частоты первичных источников электроэнергии, таких как промышленная сеть или автономный электромашинный генератор. Установки отвечают специальным требованиям по длительности импульсов и напряжению.

Генератор представляет собой электрическую машину, сочетающую достоинства компрессионных и индукторных генераторов [1–9]. Основные узлы и детали выполнены из электроизоляционных материалов, что дает возможность не ухудшая удельных энергетических характеристик значительно повысить выходное напряжение.

На рис. 1 представлено полюсное деление электромашинного индукторного генератора дискового типа.

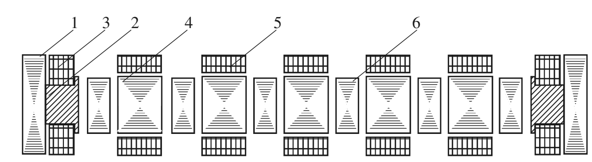


***Рис. 1**. Полюсное деление генератора*

Особенность конструкции состоит в том, что фазы статорной обмотки расположены на неподвижных дисковых модулях, которые зафиксированы в корпусе. Каждый дисковый модуль изолирован. Полюса – 4 с обмотками – 5 каждого модуля ориентированы по одной оси. По торцам машины находятся обмотки возбуждения – 3, расположенные на полюсах – 2. Магнитный поток машины направлен вдоль вала и замыкается по кольцевому магнитопроводу – 1 через соседний полюс. Модули статора и ротора чередуются. Полюса роторных дисков – 6 также ориентированы по одной оси. На рис. 2 изображен диск ротора. Следует отметить, что все вращающиеся части машины пассивные, то есть не имеют обмоток. Магнитопроводы – 2 чередуются с медными экранами – 1. Магнитопровод машины выполнен шихтованным из электротехнической стали.

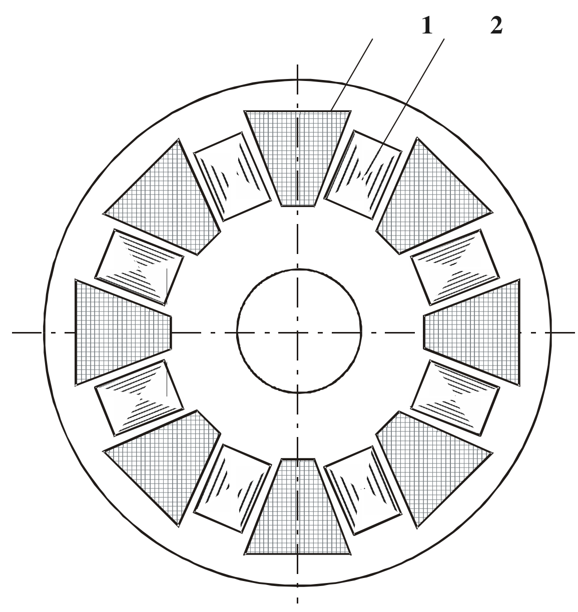


Рис. 2. *Диск ротора генератора*

Электрическая схема генератора (рис. 3) включает 1 – дроссель, 2 – обмотку возбуждения, 3 – явновыраженные ферромагнитные полюса ротора, 4 – токопроводящие вставки (демпферы), 5 – рабочую обмотку генератора, 6 – коммутирующий аппарат, 7 – нагрузку.

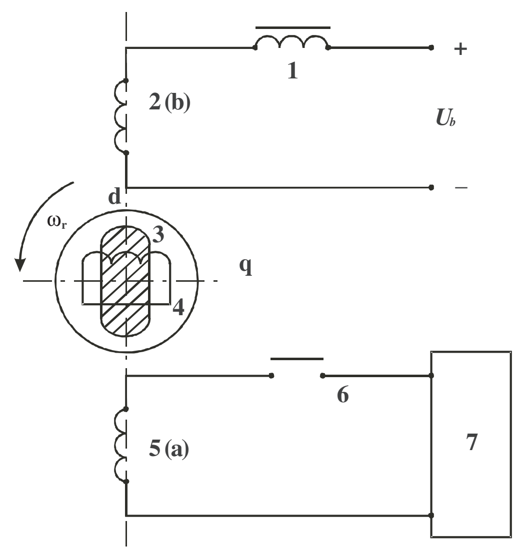


Рис. 3. *Электрическая схема генератора*

Работа генератора основана на сочетании индукторного принципа создания ЭДС в рабочей обмотке генератора и компрессии магнитного потока при изменении магнитных проводимостей воздушного зазора в аксиальном и радиальном направлениях [9]. Магнитный поток в воздушных зазорах создается обмоткой возбуждения. Переменная ЭДС рабочей обмотки на холостом ходу возникает в результате изменения потокосцепления Ψ_a а за счет изменения взаимной индуктивности M_{ab} с обмоткой возбуждения

$$e_a = -\frac{d\Psi_a}{dt} = -i_b \frac{dM_{ab}}{dt}.$$

Изменение M_{ab} обусловлено значительной разницей проводимостей основному магнитному потоку, созданному магнитодвижущей силой обмотки возбуждения за счет экранирования магнитного потока.

На рис. 4 представлены кривые изменения во времени: Ψ_b – потокосцепления обмотки возбуждения, Ψ_a – потокосцепления рабочей обмотки, i_b – тока обмотки возбуждения, i_n – тока нагрузки, M_{ab} – индуктивности взаимоиндукции обмотки возбуждения и рабочей обмотки, e_a – ЭДС рабочей обмотки.

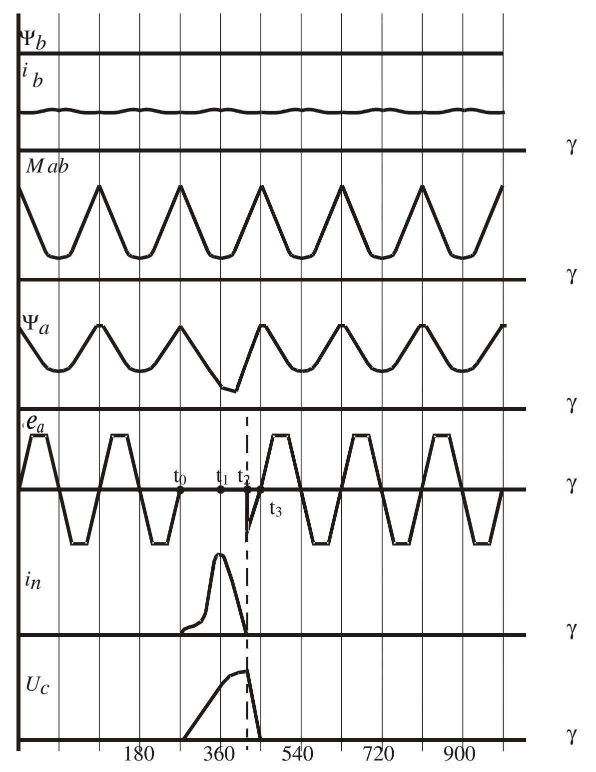


Рис. 4. *Кривые изменения Ψ_a, Ψ_b — потокосцепления обмоток статора и возбуждения, i_b, i_n — токи, протекающие по обмотки возбуждения и нагрузки, U_c — напряжение на емкости, M_{ab} — индуктивности взаимоиндукции обмотки возбуждения и рабочей обмотки, e_a — ЭДС рабочей обмотки*

В исходном состоянии диски ротора генератора вращаются с угловой частотой ω относительно дисков статора и дисков системы возбуждения, коммутирующий аппарат – 6 разомкнут. Обмотка возбуждения подключена к источнику постоянного напряжения (U_b) и по ней протекает ток (i_b), который создает основной магнитный поток возбуждения генератора. В период холостого хода ($t=t_0$) импульсный генератор работает как индукторный синхронный генератор. Соотношение между частотой ЭДС рабочей обмотки $f=1/T$, где T – период ЭДС, частотой вращения статора n (об/мин) и числом пар полюсов p имеет вид $f=2pn/60$, Гц.

В момент времени $t=t_0$, когда потокосцепление рабочей обмотки статора – 5 достигает максимального значения (положение ротора показано на рис. 3) на коммутирующий аппарат – 6 подается управляющий сигнал, и рабочая обмотка генератора

подключается к нагрузке (ёмкостной накопитель энергии). При дальнейшем повороте ротора проводимость основному магнитному потоку уменьшается за счет экранирования. В рабочей обмотке и нагрузке протекает однополярный импульс тока i_n, достигая максимума при $t=t_1$. При переходе тока через нулевое значение в момент $t=t_2$ коммутирующий аппарат – 6 отключает генератор от нагрузки. Таким образом, происходит заряд емкостного накопителя энергии (U_c) с последующим его разрядом на нагрузку (рис. 4). В момент времени $t=t_3$ при подаче управляющего импульса на коммутирующий аппарат – 6 работа генератора будет происходить аналогично. Задавая закон управления коммутатором – 6, и изменяя частоту вращения ротора, можно обеспечить частоту и скважность импульсов в нагрузке.

Для исследования характеристик индукторно-компрессионного генератора использована математическая модель, основанная на численном решении дифференциальных уравнений, составленных в соответствии с электрической схемой замещения:

$$\frac{d\Psi_a}{dt} = -(r_a + r_n)i_a - U_c, \quad \frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C_n} i_a,$$

$$\frac{d\Psi_b}{dt} = U_b - r_b\, i_b,$$

где U_b, U_c – напряжения на зажимах обмотки возбуждения и емкостной составляющей нагрузки; Ψ_a, Ψ_b – потокосцепления обмоток статора и возбуждения; i_a, i_b – токи, протекающие по обмоткам; r_a, r_b – активные сопротивления обмоток.

Система алгебраических уравнений электромагнитных связей обмоток имеет вид

$$\left.\begin{aligned} \Psi_a &= L_a\, i_a + M_{ab}\, i_b \\ \Psi_b &= M_{ba}\, i_a + L_b\, i_b \end{aligned}\right\}. \qquad (1)$$

Индуктивности в ур. (1) является функциями угла поворота ротора, рис. 5.

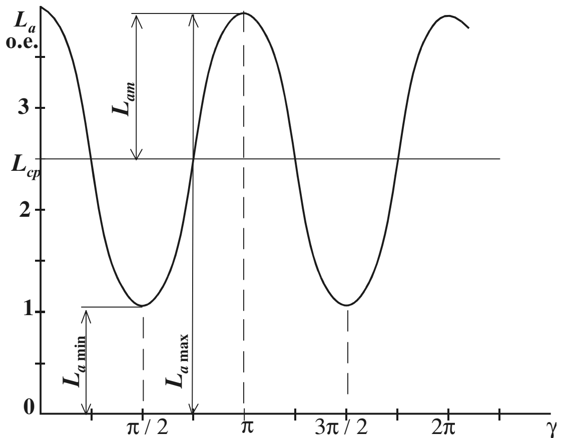


Рис. 5. *Зависимость индуктивности рабочей обмотки статора от угла положения ротора*

$$L_a = \left(\frac{L_{a\max} + L_{a\min}}{2}\right) + \left(\frac{L_{a\max} - L_{a\min}}{2}\right)\cos(2\gamma),$$

$$L_b = \left(\frac{L_{b\max} + L_{b\min}}{2}\right) + \left(\frac{L_{b\max} - L_{b\min}}{2}\right)\cos(2\gamma),$$

$$M_{ab} = \frac{M_{ab\max} + M_{ab\min}}{2} + \left(\frac{M_{ab\max} - M_{ab\min}}{2}\right)\cos(2\gamma),$$

где $M_{ab\max}$, $M_{ab\min}$ – максимальная и минимальная взаимная индуктивность обмоток.

При расчете электромагнитных процессов в электромашинном индукторно-компрессионном генераторе дискового типа, принимались следующие основные допущения:

- отсутствие переменного насыщения магнитной цепи;
- отсутствие гистерезиса и вытеснения тока в меди обмоток;
- синусоидальное распределение на полюсном делении магнитодвижущих сил и магнитных индукций;
- независимость индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток от положения ротора.

Указанные допущения, идеализируя машину, позволяют изучить в пределах допустимых отклонений картину процессов, протекающих в реальной машине.

На основе математической модели рассчитаны характеристики генератора средней мощности с диаметром активной зоны 0,34 м, числом полюсов $2p$ =8 при работе на емкостную нагрузку с постоянной частотой вращения ротора n = 3000 об/мин.

Ограничения при расчете соответствуют плотности тока J = 5...6 А/мм^2 и напряжению на рабочей обмотке $U_ф$ = 40...50 кВ, которые приняты исходя из класса нагревостойкости F и электрической прочности изоляции. В качестве критерия для определения согласованной нагрузки принят максимум средней мощности генератора.

Расчеты показали, что максимальная средняя мощность в нагрузке составляет ≈35 кВт при согласованной емкостной нагрузке 60 нФ. Напряжение заряда емкости составляет ≈50 кВ. За один импульс в согласованную нагрузку передается около 80 Дж электрической энергии. Максимальный ток заряда конденсатора составляет 2,25 А. КПД при работе генератора на емкостную нагрузку составляет ≈0,75.

Из проведенных вычислительных экспериментов при работе индукторно-компрессионного генератора на активно-емкостную нагрузку (рис. 6) следует, что максимальное значение активной мощности $P_{n\max}$≈15 кВт достигается при активном сопротивлении R_n=3 кОм для $\cos\varphi$=0,8, которому соответствуют КПД η=0,75 и напряжению на рабочей обмотке $U_ф$ = 55 кВ. Анализ энергетических характеристик генератора показал, что при работе на активно-емкостную нагрузку в диапазоне изменения коэффициента мощности $\cos\varphi$=0,2...0,8 согласованное сопротивление активной нагрузки составляет 2...3 кОм (рис. 6, *в*), ток нагрузки 2...2,5 А (рис. 6, *г*).

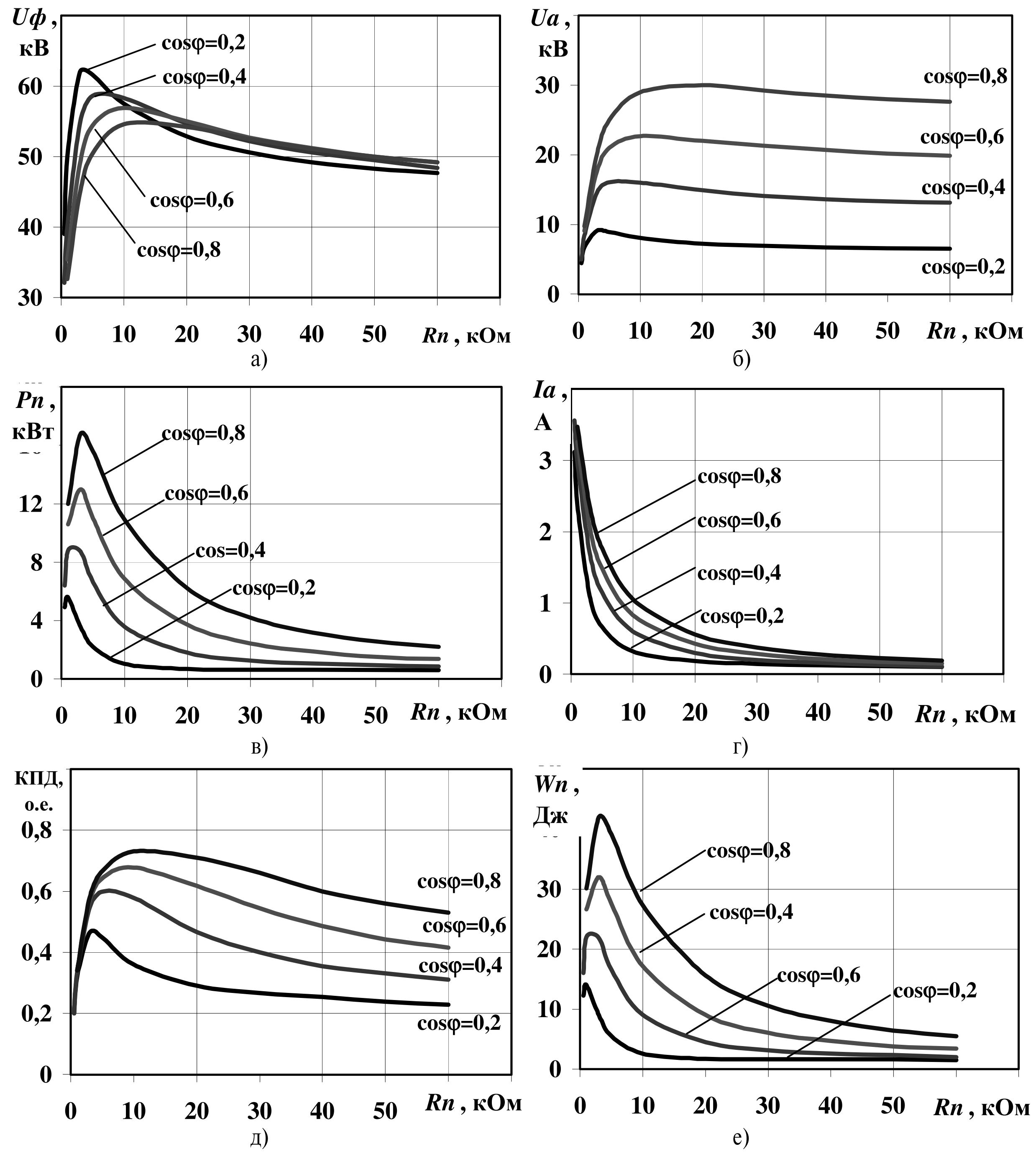
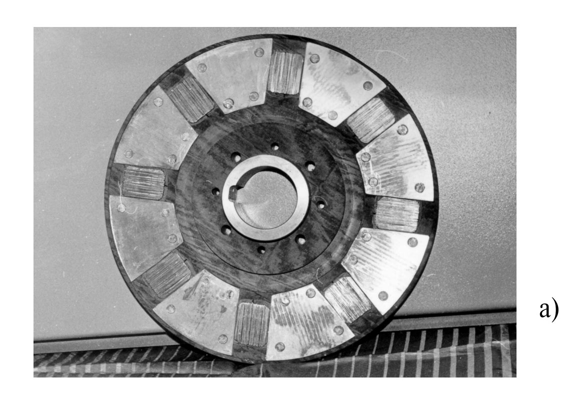


Рис. 6. *Зависимости индукторно-компрессионного генератора при работе на активно-емкостную нагрузку*

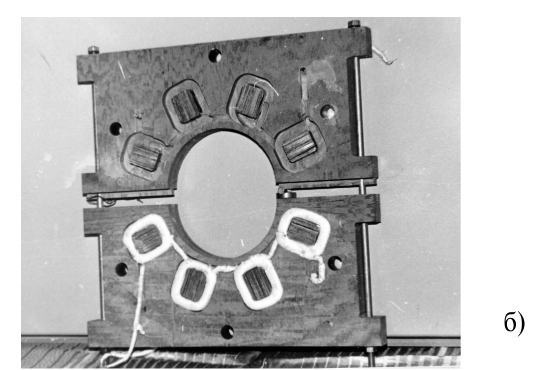
Расчеты показали, что средняя активная мощность генератора лежит в пределах 8…13 кВт (рис. 6, *в*) при напряжении на активной составляющей 15… 20 кВ (рис. 6, *б*). КПД при этом достигает ≈0,6 (рис. 6, *д*), а импульсная энергия, выделяющаяся в активной нагрузке 35…45 Дж (рис. 6, *е*) при частоте 100 Гц.

Для проверки результатов теоретических исследований индукторно-компрессионного генератора проведены соответствующие эксперименты. Фрагменты статора и ротора экспериментального образца генератора показаны на рис. 7.

Генератор испытывался в частотном режиме. На рис. 8 показан характер изменения индуктивности обмоток генератора в зависимости от углового положения ротора. На рис. 9 представлены осциллограммы напряжения на рабочей обмотке E_{xx} (верхний луч) и тока в обмотке возбуждения I_b (нижний луч) при работе генератора на холостом ходу.



а)



б)

Рис. 7. *Активная зона модуля а) ротора и б) статора*

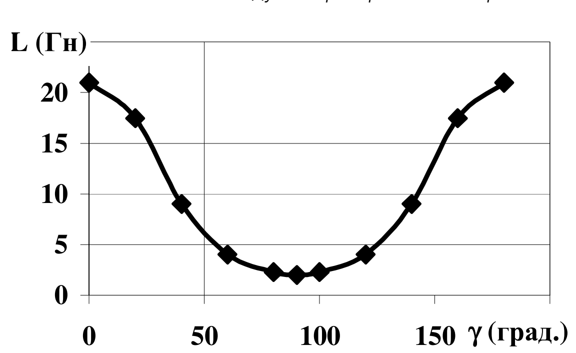


Рис. 8. *Экспериментальная кривая изменения индуктивности генератора*

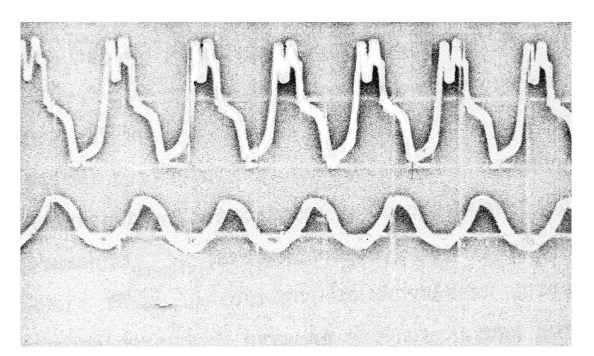
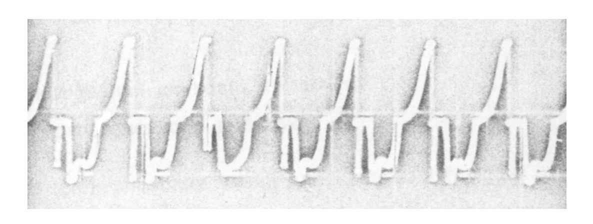


Рис. 9. *Осциллограммы ЭДС обмотки статора и тока возбуждения генератора на холостом ходу*

На рис. 10 представлены осциллограммы ЭДС рабочей обмотки E_a (верхний луч), напряжения U_c и тока I_c при работе генератора в периодическом режиме с зарядом емкостного накопителя и последующим его разрядом на каждом периоде с частотой 400 Гц.



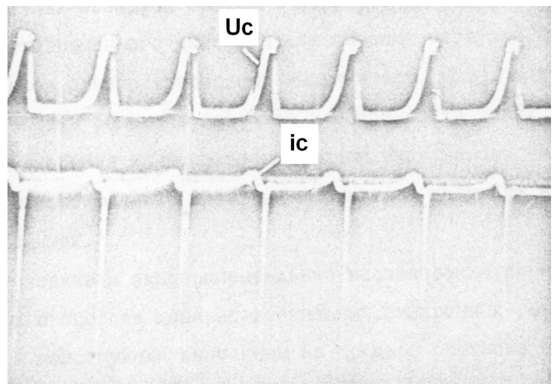


Рис. 10. *Осциллограммы переходных процессов*

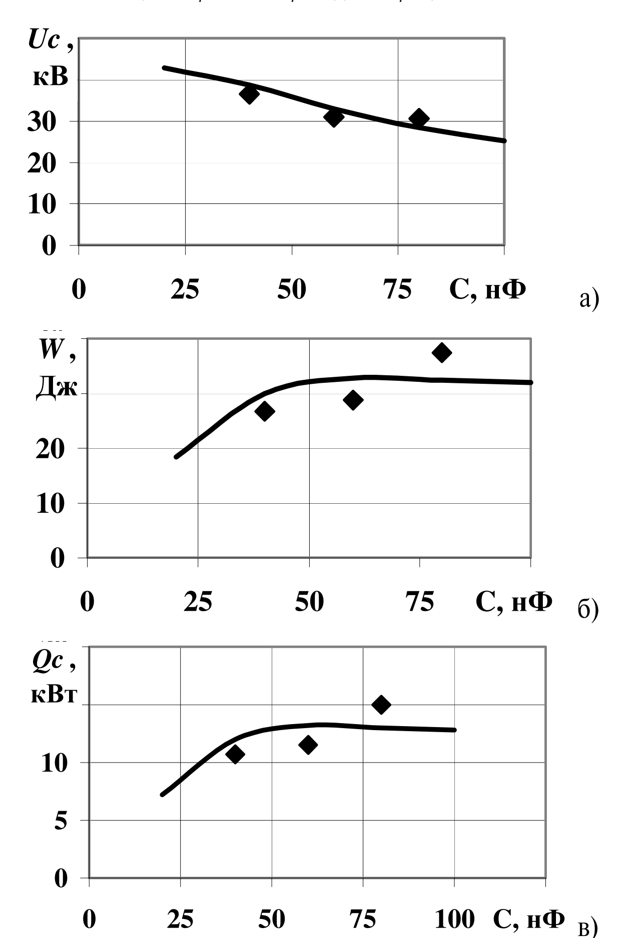


Рис. 11. *Энергетические характеристики генератора*

На рис. 11 представлены результаты расчета и экспериментальных исследований высоковольтного индукторно-компрессионного генератора при частоте вращения ротора 3000 об/мин и индукции возбуждения $B_\delta = 0{,}5$ Тл. Сплошными линиями по-

казаны результаты, полученные расчетным путем, а точками отмечены экспериментальные данные.

Результаты показывают, что при согласованной нагрузке C=60 нФ, $X_c\approx 2Z_{a\min}$, где $X_c=1/\omega C\approx$6,63 кОм, $Z_{a\min}=\sqrt{(\omega L_a^{\min})^2+r_a^2}\approx$5кОм при $\omega=2\pi f$=2512 c^{-1}, f=400 Гц достигается максимальная энергия, передаваемая в нагрузку за один импульс.

Мощность генератора при работе на активно-емкостную нагрузку с $\cos\varphi$=0,4...0,6 составляет $P_n\approx$10 кВт. Масса генератора 150 кг, удельная мощность ≈67 Вт/кг.

Полученные экспериментальные значения совпадают с расчетными. Это доказывает адекватность математической модели и перспективы использования высоковольтного электромашинного индукторно-компрессионного генератора дискового типа для питания высоковольтных потребителей импульсами электрической энергии при напряжениях 10...50 кВ и частоте 100 Гц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глебов И.А., Кашарский Э.Г., Рутберг Ф.Г. Синхронные генераторы в электрофизических установках. — Л.: Наука, 1977. — 197 с.
2. Chuchalin A.I., Muravlev I.O., Safyannikov I.A., Rossamahin I.N. High-Voltage Electrical Machine Disk Generator // Intern. Conference on Electrical Machines (ICEM'98). — September 2–4, 1998, Istambul, Turkey, 1998. — V. 2/3. — P. 814–816.
3. Глебов И.А., Кашарский Э.Г., Рутберг Ф.Г. Синхронные генераторы кратковременного и ударного действия. — Л.: Наука, 1985. — 224 с.
4. Чучалин А.И. Многозазорные электромашинные генераторы дискового типа // Электромашинные машинно-вентильные источники импульсной мощности: Тез. Всес. докл. науч. конф. — Томск, 1987. — С. 91–94.
5. Сипайлов Г.А., Лоос А.В., Чучалин А.И. Электромашинное генерирование импульсных мощностей в автономных режимах. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 169 с.
6. Чучалин А.И. Импульсные генераторы на основе электромеханических преобразователей // Известия вузов. Электромеханика. — 1989. — № 12. — С. 23–33.
7. Сипайлов Г.А., Хорьков К.А. Генераторы ударной мощности. — М.: Энергия, 1979. — 128 с.
8. Chuchalin A.I., Muravlev I.O., Safyannikov I.A. Power sources for technological systems // The 5th Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology (KORUS'01). — Tomsk: TPU, 2001. — P. 228–231.
9. Chuchalin A.I., Muravlev I.O., Safyannikov I.A., Laas A.R. High-voltage recurrent pulse generator MTT'2001 // The 7th Intern. Scientific and Practical Conf. of Students, Post-graduates, and Young Scientists. Modern techniques and technology, February 26 — March 2, 2001, Tomsk, Russia, 2001. — P. 95–97.